

УДК 661.93

В.И. Файнштейн*, **Н.А. Пуртов**

ОАО «Криогенмаш», пр. Ленина, 67, г. Балашиха Московской области, РФ, 143907

*e-mail: fainshtein@criogenmash.ru

УПРАВЛЕНИЕ КЦА-УСТАНОВКОЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕЁ ЭФФЕКТИВНОЙ РАБОТЫ В НЕРАСЧЁТНЫХ РЕЖИМАХ

Установки, в которых используется короткоцикловая адсорбция (КЦА), широко применяются для обеспечения кислородом или азотом различных потребителей. Их производительность зависит от температуры воздуха, всасываемого компрессором. Выбор компрессора производится для условий работы КЦА-установки в номинальном режиме. Поэтому при изменении температуры воздуха КЦА-установка работает в нерасчётном режиме. Её производительность и другие характеристики при эксплуатации в таких режимах могут существенно изменяться. Рассмотрены возможности обеспечения эффективной работы КЦА-установки в нерасчётных режимах с незначительным изменением характеристик. Для этого предложено в циклограмму вводить периоды остановок цикла. Приводится методика расчёта продолжительности этих остановок, излагаются общие требования к выбору компрессора, объёмов воздушного и продукционного ресиверов.

Ключевые слова: Воздух. Короткоцикловая адсорбция. Кислород. Азот. Воздушный компрессор. Нерасчётные режимы работы. Регулирование. Циклограмма. Ресивер. Производительность.

V.I. Fainshtein, N.A. Purto

MANAGEMENT OF PSA-PLANT FOR MAINTENANCE OF EFFECTIVE WORK IN OFF-DESIGN BEHAVIOR MODES

Plants in which used a pressure-swing adsorption (PSA) are widely applied for maintenance of various consumers by oxygen or nitrogen. Their productivity depends on air' temperature which are intake in the compressor. The choice of the compressor is made for operating conditions of PSA-plant in nominal mode. Therefore PSA-plant works in off-design behavior modes at change of temperature of air. Its productivity and other characteristics at operation in such modes can essentially change. It is shown how to provide an effective work of PSA-plant in off-design behavior modes with little change of characteristics. For this purpose is offered to enter in actigram the periods of stops of a cycle. The design procedure of duration of these stops is resulted, the general requirements to choice of the compressor and volumes of receivers are stated.

Keywords: Air. Pressure-swing adsorption (PSA). Oxygen. Nitrogen. Air compressor. Off-design behavior modes. Regulation. Actigram. Receiver. Productivity.

1. ВВЕДЕНИЕ

При создании для конкретных потребителей кислородных или азотных установок короткоцикловой адсорбции (КЦА) обычно исходят из требуемых параметров продукта (расхода, чистоты и давления), для обеспечения которых определяются максимальное давление в адсорберах и их размеры, параметры циклограммы переключения клапанов и необходимый расход перерабатываемого воздуха.

Подбор воздушного компрессора для КЦА-установки представляет часто непростую задачу. Обусловлено это тем, что ряды выпускаемых компрессо-

ров оказываются достаточно редкими. Поэтому обычно выбирается компрессор, производительность которого заметно выше расчётного расхода перерабатываемого воздуха. В связи с этим, при наладке установки требуется приведение производительности компрессора в соответствие с расходом воздуха, необходимым для работы КЦА-установки в заданном режиме.

У большинства выпускаемых винтовых и поршневых компрессоров не предусмотрено экономичное регулирование производительности. Имеющиеся системы поддержания определённого давления после компрессоров путём их разгрузки крайне неэффективны и не могут в условиях длительной работы в сос-

таве установки обеспечить подачу заданного расхода воздуха, так как должны включаться почти ежеминутно. Некоторые вопросы, связанные с взаимодействием компрессора и кислородной КЦА-установки, были уже рассмотрены в работах [1,2]. В частности, исследовалось влияние на работу установки разгрузки компрессора на этапе выравнивания давлений.

Компрессоры с регулированием производительности изменением числа оборотов, более приспособленные для рассматриваемых условий работы, не нашли пока сколь-нибудь широкого применения в КЦА-установках.

Поэтому целесообразно создавать ряды установок на основе вполне определённых адсорберов с учётом существующих рядов компрессоров. При таком подходе необходимо удовлетворять конкретным требованиям потребителей за счёт регулирования и оптимизации процессов КЦА. Анализ такой работы установок в нерасчётных режимах возможен при использовании их моделей, адекватно описывающих реально реализуемые процессы.

При подготовке статьи использована разработанная ранее методика расчёта процессов КЦА, которая адаптирована к кислородным и азотным установкам с наиболее часто применяемыми сорбентами [1]. Она позволяет исследовать возможности регулирования и оптимизации работы указанных установок. Ниже приведены результаты такого анализа применительно к кислородным КЦА-установкам.

2. ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ КЦА-УСТАНОВОК В НЕРАСЧЁТНЫХ РЕЖИМАХ

В технологическую схему КЦА-установки входят компрессор 1, адсорберы 2, продукционный кислородный ресивер 3, клапаны (см. рис. 1). Переключение клапанов производится по заданной циклограмме. После компрессора обычно устанавливается ресивер (для упрощения на схеме не показан). Трубопроводы технологических потоков содержат дроссельные органы, предназначенные для регулирования процессов КЦА.

Технологический процесс реализуется в результате циклического изменения давления в адсорберах (см. рис. 2). При повышенном давлении происходит преимущественная адсорбция удаляемых компонентов, а при снижении давления — их десорбция и подготовка сорбента к следующему циклу работы. Соответственно, циклически изменяются давления в воздушном и продукционном ресиверах, являющихся неотъемлемой частью КЦА-установок.

Размеры дроссельных диафрагм и параметры циклограммы переключения клапанов оптимизируются при наладке КЦА-установок, исходя из условий их работы в номинальном режиме, приводятся в соответствие с располагаемым расходом воздуха, который определяет и максимальное рабочее давление в адсорберах.

Если производительность компрессора выше номинальной, может достигаться и более высокая про-

изводительность установки. Очевидно, что возможности такой оптимизации не безграничны. В процессе эксплуатации установок обычно не предусматриваются какие-либо изменения параметров циклограммы и дроссельных устройств.

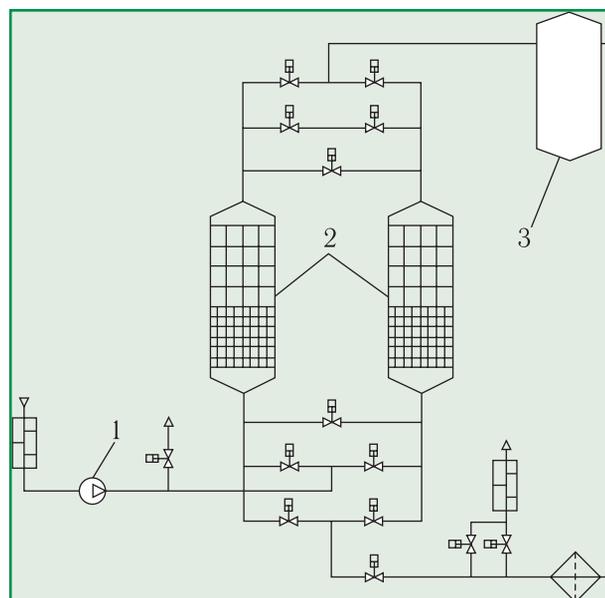


Рис. 1. Технологическая схема КЦА-установки

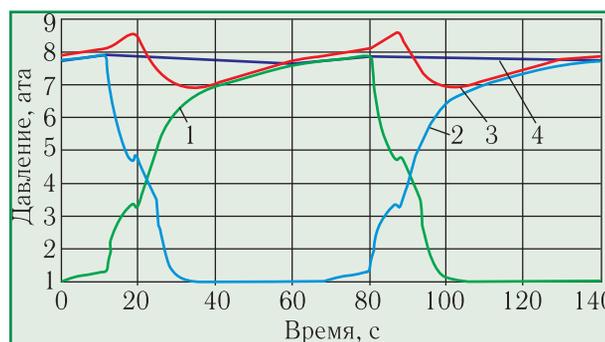


Рис. 2. Изменение давления в аппаратах КЦА-установки: 1, 2 — в адсорберах; 3, 4 — воздушном и кислородном ресиверах, соответственно

Заметное влияние на работу КЦА-установки оказывает изменение температуры всасываемого компрессором воздуха T_b . Обычно расчётные показатели установок приводятся к условиям номинального расчётного режима, когда, например, $T_b = 293 \text{ K}$ ($20 \text{ }^\circ\text{C}$). Реально же температура может меняться в достаточно широких пределах, даже в течение суток.

Как следует из рис. 3, в летнее время производительность компрессора может снижаться примерно на 5 % от расчётной, а в зимнее время возрастать более чем на 11 %.

Если не предпринимать никаких мер, то изменение температуры воздуха заметно скажется на максимальном давлении в адсорберах КЦА-установки и чистоте продукта, как следует из рис. 4. Если же чистоту продукта поддерживать постоянной, производительность установки всё равно будет заметно зависеть от T_b (рис. 5).

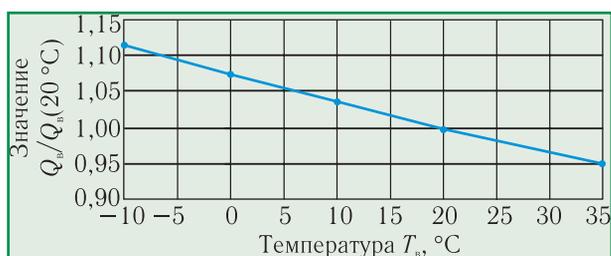


Рис. 3. Изменение массовой производительности объёмных компрессоров Q_v от T_v , отнесённой к производительности $Q_v(20^\circ\text{C})$

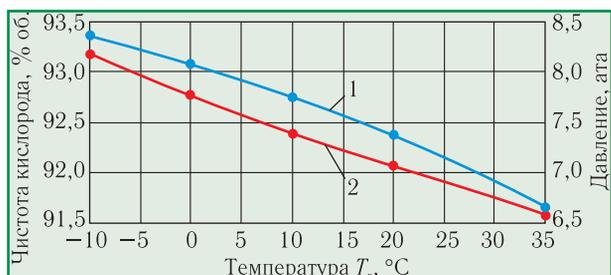


Рис. 4. Влияние T_v на чистоту кислорода (1) и давление в адсорберах (2) при температуре воздуха на входе в адсорберы 20°C

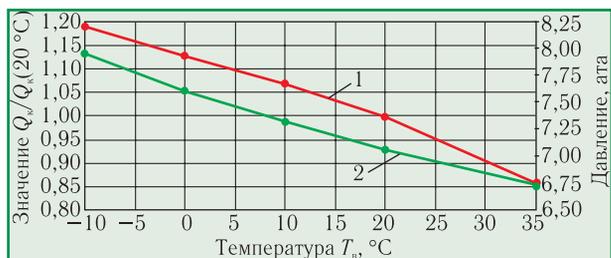


Рис. 5. Зависимость относительной производительности кислородной КЦА-установки $Q_k/Q_k(20^\circ\text{C})$ (в долях от производительности при 20°C) (1) и давления в адсорберах (2) от T_v при постоянной чистоте продукта (содержание кислорода 92,4 %) и температуре воздуха на входе в адсорберы 20°C

Как видно из рис. 5, при понижении T_v давления в адсорберах и на выходе из компрессора могут заметно повышаться и выходить за установленные пределы.

Исследования КЦА-установок [1,2] показывают, что имеются определённые возможности путём переналадки технологического режима (изменением параметров циклограммы и размеров дроссельных устройств) обеспечить переработку повышенного расхода воздуха. Однако это — достаточно трудоёмкая, требующая высокой квалификации работа, которая выполняется только при вводе установок в эксплуатацию, естественно, при имеющихся в это время условиях. Организовать проведение такой переналадки силами эксплуатационного персонала практически невозможно.

Как уже отмечалось, системы регулирования винтовых и поршневых компрессоров, в отличие от турбокомпрессоров, не предусматривают обычно плавного регулирования производительности. Эти машины оснащены только устройствами, разгружающими компрессор при повышении давления выше заданно-

го. Указанные устройства на компрессорах КЦА-установок можно использовать лишь для предотвращения аварийных ситуаций, так как в нормальных условиях давление после компрессора постоянно изменяется с определённой цикличностью.

В таких условиях избыток воздуха, возникающий при пониженных температурах, может быть устранён только сбросом его в атмосферу, что экономически невыгодно, или реализацией определённых технологических мероприятий: регулированием температуры на входе воздуха в адсорберы или оснащением установок специальными системами управления, изменяющими циклограмму переключения клапанов в зависимости от максимального давления в адсорберах.

3. ВОЗМОЖНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ КЦА-УСТАНОВКОЙ В НЕРАСЧЁТНЫХ РЕЖИМАХ

Корректировку режима работы КЦА-установки при изменении расхода подаваемого воздуха, в частности, из-за отклонений T_v от номинального значения, можно выполнять в автоматическом режиме при сохранении удельных показателей установки (q_0 , q_m), рассчитываемых для оптимального значения продолжительности стадии адсорбции и заданной чистоты продукта, достигнутых при наладке установки. С этой целью необходимо в циклограмме переключения клапанов предусмотреть интервал остановки цикла τ_0 . Его наиболее удобно вводить сразу после окончания стадии выравнивания давлений.

В этом случае действительный расход воздуха и производительность установки по кислороду будут описываться следующими зависимостями:

$$Q_v = V_a q_0 3600 / (\tau_a + \tau_{\text{выр}} + \tau_0); \quad (1)$$

$$Q_k = V_a q_m 3600 / (\tau_a + \tau_{\text{выр}} + \tau_0); \quad (2)$$

где V_a — объём сорбента; Q_v — производительность компрессора, $\text{м}^3/\text{ч}$; Q_k — производительность установки по кислороду, $\text{м}^3/\text{ч}$; q_0 — удельная цикловая нагрузка по воздуху при $\tau_0=0$, $\text{м}^3/\text{м}^3$ адс.; q_m — удельная цикловая производительность по кислороду при $\tau_0=0$, $\text{м}^3/\text{м}^3$ адс.; τ_a — продолжительность стадии адсорбции, с; $\tau_{\text{выр}}$ — продолжительность стадии выравнивания давлений, с; τ_0 — продолжительность остановки циклограммы, с.

Если принять постоянными q_0 и q_m , зависящие только от давления нагнетания компрессора и чистоты продукта, то будет справедливо выражение:

$$Q_k(20^\circ\text{C}) / (\tau_a + \tau_{\text{выр}} + \tau_0) = Q_{v1} / (\tau_a + \tau_{\text{выр}} + \tau_{01}), \quad (3)$$

где $Q_k(20^\circ\text{C})$ — расход воздуха в номинальном режиме, например при температуре на всасывании 293 К; Q_{v1} — расход воздуха в режиме работы компрессора при некоторой температуре всасываемого воздуха T_{v1} ; τ_0 и τ_{01} — продолжительности остановок циклограмм при двух указанных режимах, с.

Таблица 1. Расчётные показатели установки при введении в циклограмму остановок цикла

$Q_{в1}/Q_{в}(20\text{ }^{\circ}\text{C})$	$T_{в1},\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{в1},\text{ K}$	$\tau_a+\tau_{выр},\text{ с}$	$\tau_o,\text{ с}$	$\tau_{o1},\text{ с}$	$Q_{к1}/Q_{к}(20\text{ }^{\circ}\text{C})$	$\tau_{пц1}$	$\tau_{пц,ном}$	$E_{в1}/E_{в}(20\text{ }^{\circ}\text{C})$
1,11	-10	263	65	5	13	1,11	78,0	70	0,90
1,07	0	273	65	5	10	1,07	75,1	70	0,93
1,04	10	283	65	5	7,5	1,04	72,5	70	0,97
1,00	20	293	65	5	5	1,00	70,0	70	1,00
0,97	30	303	65	5	2,7	0,97	67,7	70	1,03
0,95	35	308	65	5	1,6	0,95	66,6	70	1,05
0,94	40	313	65	5	0,5	0,94	65,5	70	1,07

Примечания: $\tau_{пц}$ — продолжительность полуцикла, равная ($\tau_a+\tau_{выр}+\tau_{o1}$); $\tau_{пц,ном}$ — продолжительность полуцикла в номинальном режиме, равная ($\tau_a+\tau_{выр}+\tau_o$); $E_{в}(20\text{ }^{\circ}\text{C})$ и $E_{в1}$ — удельные расходы энергии при температурах воздуха на всасывании в компрессор 293 К и $T_{в1}$.

Продолжительности остановки циклограмм τ_o при $T_{в}=293\text{ K}$ и τ_{o1} при $T_{в1}$ связаны соотношением:

$$\tau_{o1}=(\tau_a+\tau_{выр}+\tau_o)\frac{Q_{в1}}{Q_{в}(20\text{ }^{\circ}\text{C})}-(\tau_a+\tau_{выр}), \quad (4)$$

где $Q_{в1}/Q_{в}(20\text{ }^{\circ}\text{C})=293/T_{в1}$.

Таким образом, чтобы при изменении температуры воздуха на всасывании в компрессор сохранить прежним режим КЦА-установки, необходимо изменить τ_o в соответствии с зависимостью (4). При этом для сохранения чистоты продукта установка должна иметь следующую производительность:

$$Q_{к1}=Q_{к}(20\text{ }^{\circ}\text{C})(\tau_a+\tau_{выр}+\tau_{o1})/(\tau_a+\tau_{выр}+\tau_o), \quad (5)$$

где $Q_{к}(20\text{ }^{\circ}\text{C})$ и $Q_{к1}$ — количество производимого кислорода при температурах воздуха на всасывании в компрессор 293 К и $T_{в1}$, соответственно.

Результаты расчётов τ_{o1} и других показателей КЦА-установки приведены в табл. 1.

Описанный алгоритм регулирования работы установки может быть реализован как в ручном, так и в автоматическом режимах. Однако его использование возможно только при соответствующем (достаточно значительном) увеличении ёмкости воздушного и кислородного ресиверов. Последнее необходимо, чтобы предотвратить во время остановки цикла чрезмерное повышение давления в воздушном ресивере и недопустимое понижение давления в кислородном ресивере.

В связи с тем, что в КЦА-установках в основном используются компрессоры с воздушным охлаждением, изменение температуры всасываемого воздуха приводит к изменению температуры воздуха, поступающего в адсорберы. Это сказывается на их температурном режиме.

Из представленных в табл. 2 данных о влиянии температуры перерабатываемого воздуха на коэффициент извлечения, полученных в результате обработки результатов испытаний кислородной установки АдКт-0,007, следует, что понижение температуры перерабатываемого воздуха приводит к заметному снижению коэффициента извлечения кислорода [1]. При этом увеличение производительности компрессора, обусловленное понижением температуры всасываемого

воздуха, оказывается недостаточным для поддержания давления в адсорберах на прежнем уровне. Поэтому положительный эффект от повышения производительности компрессоров в зимнее время может быть реализован только тогда, когда в этих условиях исключается понижение температуры воздуха, поступающего из осушителя в адсорберы, и она поддерживается на необходимом уровне.

Таблица 2. Влияние температуры воздуха на входе в адсорберы

Температура воздуха, поступающего в адсорберы, $^{\circ}\text{C}$	Коэффициент извлечения кислорода ($y=93\text{ }%$)	Относительная производительность по кислороду
15	0,344	0,87
20	0,369	0,93
25	0,396	1,00
30	0,424	1,07
35	0,453	1,16

При проектировании КЦА-установки, как следует из табл. 2, необходимо учитывать диапазон возможного изменения температуры воздуха, всасываемого компрессором, для обеспечения её адаптации к условиям работы, отличающимся от номинальных.

Способ дискретного регулирования производительности КЦА-установок путём остановки цикла может быть достаточно эффективно использован при оснащении её несколькими нагнетателями или при работе от воздушной сети. При этом установка во всех режимах работы требует одинакового удельного расхода энергии на производство кислорода. Необходимую величину продолжительности остановки цикла в зависимости от количества производимого продукта можно рассчитать с учётом выражения (4).

Возможности регулирования производительности КЦА-установок тесно связаны с размерами производственных ресиверов, в которые продукт поступает из адсорберов. При этом всегда предполагается, что расход продукта, выходящего из ресивера, постоянен. В то же время следует учитывать особенности потребителей продуктов. Можно выделить следующие группы потребителей в зависимости от условий использования кислорода или азота:

– потребители, у которых кислород, а иногда и азот, используется в непрерывных технологических процессах при наполнении баллонов в медицинских учреждениях, а также при работе всевозможных печей, куда подаётся обогащённый кислородом воздух;

– потребители, использующие азот для разовых технологических операций (продувка аппаратов, противопожарные мероприятия и т.п.), для чего всегда должно быть в наличии определённое количество азота заданной чистоты и давления.

В случае потребителей первой группы установка должна обеспечивать выдачу заданного среднечасового количества кислорода при определённом давлении.

Учитывая, что производционный кислород или азот выходят из адсорберов КЦА-установки периодически, после них всегда предусматривается производционный ресивер, вместимость которого V_p может быть рассчитана, исходя из принятого максимально допустимого перепада давлений в этом аппарате ΔP , среднего расхода продукта и периода времени, в течение которого продукт не поступает в соответствующий ресивер или не отбирается из него. Методика определения V_p изложена в ряде руководств, например, в [3].

В тех случаях, когда потребителю необходим определённый запас продукта для покрытия пиковых потребностей, следует предусматривать специальный (пиковый) ресивер, располагаемый после производционного ресивера установки или после дожимающего компрессора. Использовать для этих целей производционные ресиверы КЦА-установок не представляется возможным.

Следует иметь в виду, что рассматриваемые КЦА-установки очень чувствительны к неравномерному отбору продукта из ресивера. Поэтому даже кратковременное увеличение его расхода и, соответственно, уменьшение давления в производционном ресивере может приводить к заметному и длительному ухудшению качества продукта, выдаваемого установкой.

Необходимый объём газа в пиковом ресивере,

перепад давлений в нём и производительность нагнетателя подлежат специальной проработке, исходя из требований заказчика.

В то же время КЦА-установки достаточно устойчивы к ситуациям, когда расход отбираемого продукта уменьшается. Это приводит к улучшению качества продукта, однако сопровождается повышением максимального давления в адсорберах и после воздушно-го компрессора.

4. ВЫВОДЫ

При проектировании КЦА-установок необходимо принимать во внимание диапазон возможного изменения температуры воздуха, всасываемого компрессором и рассматривать возможности их адаптации к различным условиям работы.

Для экономичного регулирования целесообразно оснащение КЦА-установок компрессорами с регулированием производительности изменением числа оборотов.

Вопросы, связанные с обеспечением пиковых расходов продуктов, следует тщательно прорабатывать на этапе проектирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Результаты испытаний промышленной кислородной КЦА-установки/ **В.И. Файнштейн, Н.А. Пуртов, Ю.Н. Кобец, В.Я. Шкадов**// Технические газы. — 2006. — № 5. — С. 67-72.
2. Результаты испытаний кислородных установок КЦА/ **В.И. Файнштейн, Ю.Н. Кобец, Д.И. Масумов и др.**// Технические газы. — 2005. — № 1. — С. 23-29.
3. Поршневые компрессоры/ **С.Е. Захаренко, С.А. Анисимов, В.А. Дмитриевский и др.** — М.-Л.: Гос. научно-техн. изд-во машиностроительной лит-ры, 1961. — 455 с.



ВНИМАНИЮ РУКОВОДИТЕЛЕЙ ПРЕДПРИЯТИЙ, ВЫПУСКНИКОВ ТЕХНИКУМОВ И ТЕХНИЧЕСКИХ КОЛЛЕДЖЕЙ!



- получение высшего образования без отрыва от производства за 4 года;
 - зачисление без экзаменов сразу на 3-ий курс
- Одесской государственной академии холода по направлению Украинской ассоциации производителей технических газов «УА-СИГМА»;**
- специальность — 7.090507 «Криогенная техника и технология»;
 - форма обучения — заочная контрактная;
 - завершение учебы — защитой дипломного проекта;
 - диплом Министерства образования и науки Украины признается в странах СНГ.

Условия приёма по контактному тел./факсу: +38 (048) 777-00-87